

# 생태학적 · 육수학적 현상들에 대한 프랙탈의 적용

이 도 원\* · 장 현 정 · 강 신 규

(서울대학교 환경대학원 환경계획학과, 서울 151-742)

Fractal Approaches to Ecological and Limnological Phenomena. Lee, Dowon,\* Hyunjeong Chang, Sinkyu Kang (Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea)

Fractal geometry has become one of prospective research approaches as the complex structure of natural entities is not easily characterized by traditional Euclidean geometry. With the fractal geometry, we can better decipher the complex structure and identify natural and anthropogenic agents of landscape patterns occurring at different spatial scales. The usefulness of fractal, however, has not been fully appreciated among Korean academic societies, especially in ecological and limnological fields. We attempt to address three points in this study. First, we introduce the concept and dimension of fractal and review relevant research approaches, especially with respect to ecological and limnological phenomena. Second, we explore possible applications of fractal to some aspects of geography and land use characteristics in South Korea. For the analyses of fractal dimensions, we used data published in other studies previously and collected for this study. Data were analyzed by a perimeter/area method of fractal dimension for the spatial distribution of global solar radiation and leaf area index, and the movement of wild boars in forested landscapes of mid-eastern Korea. The same approach was also applied to the water channel of a hypothetical river and the shape of reservoirs in Yongin, Kyunggi Province. Finally, we discuss the results and key issues to consider when a fractal approach is employed in ecology and limnology.

**Key words :** Ecology, Fractal, Limnology

## 서 론

자연은 유클리드 기하학으로 쉽게 기술할 수 있는 단순성과 함께 그렇지 않은 복잡성을 동시에 지니고 있다. 직선과 정사각형, 정육면체는 각각 더 작은 직선과 정사각형, 정육면체로 나눌 수 있다. 반면에 해안선, 식생 조각, 개체군 변동 그래프와 같은 형태는 더 작은 반복요소로 쉽게 나누어지지 않는 복잡한 특성을 지니고 있다. 그러나 자연이 본질적으로 복잡하다(불규칙하고 무작위적이다) 또는 단순하다(유클리드적이거나 질서가 있다)

라고 나누는 것은 인위적인 이분법이기도 하다. 많은 경우 우리는 자연이 제공하는 형태에서 복잡성과 독특성을 걸러내고 단순성을 추출한다. 단순한 하위단위들이 모여 복합적인 모양과 기능을 가지는 유클리드 기하학과 대조적으로 큰 인형 안에 더 작은 인형들이 연속적으로 나타나는 러시아 인형 양식으로 복잡한 하위단위들이 단순한 과정의 반복으로 모양이 이루어진다면 문제가 단순화될 수 있다. 이 반복 과정을 자기유사성(self-similarity)이라고 하며 크기가 다른 공간 규모에 상관없이 나타나기 때문에 규모 독립적 특성(scale-independent property)을 지닌다고 한다. 이러한 복잡하고

\* Corresponding author: Tel: 02) 880-5650, Fax: 02) 873-5109, E-mail: leedw@snu.ac.kr.

불규칙적인 특성을 가진 강, 산 등의 자연 및 사회 현상은 유클리드 기하학에서 상대성 이론으로 이어지는 전통 과학으로는 해석이 불가능한 혼돈(chaos)과 무질서(disorder)의 영역이었다. 하지만 1970년대 이후 chaos 또는 fractal (이하 프랙탈) 과학이라 불리는 분야에서 이런 혼돈 현상에 대한 해석이 시도되었다(Mandelbrot, 1977). 이 때 프랙탈 기하학은 복잡한 하위단위의 단순한 반복 경우를 발굴하는 과정으로 볼 수 있으며 유클리드의 기하학적 질서와 단편화(fragmentation)의 기하학적 카오스(chaos) 사이의 중간 위치에 놓이는 새로운 장으로 볼 수 있다(Hastings and Sugihara, 1993).

프랙탈 이론의 등장은 그 동안 정량적으로 접근하기 힘들었던 유형(pattern)과 관련된 연구를 가능하게 만들었다. 일례로 강이 발달되어 가는 도중에 어떠한 유형상의 변화를 수반하는가(Sapozhnikov *et al.*, 1996), 수로망과 유역의 크기간에는 어떠한 연관성이 나타나는가(Chow, 1964; Eagleson, 1970; Feder, 1988; Tarboton *et al.*, 1988; Rosso *et al.*, 1991; 전과 조, 1992), 경관의 유형은 어떠한 자연적, 인위적 요인들에 의해 결정되는가(Krummel *et al.*, 1987), 동물은 주변 경관 및 물리적 스트레스와 관련하여 어떠한 이동 유형을 보이는가(Katz and George, 1985; Wiens *et al.*, 1995; Bascompte *et al.*, 1997) 등과 같은 다양한 질문에 대한 연구를 가능케 했다. 특히 프랙탈 이론은 공간 규모가 관심대상의 유형에 결정적으로 영향을 미치는 경우에 규모와 유형 사이의 관계를 규명할 수 있는 기법을 제공하였다.

한국의 경관은 심한 기복을 보이는 지형의 영향과 집약적인 토지이용에 의한 인위적인 영향을 받으며 형성되었다. 따라서 각 요인들이 어떠한 공간적 규모에서 경관을 조직하는 주요 동인으로 작용하고 있으며 결과적으로 어떠한 복합적인 경관유형을 만들어내는가, 그리고 시간에 따라서 위 요인들은 경관을 어떻게 변화시켜 왔는가를 파악하는 것은 향후 경관을 보존 및 설계하는데 있어 매우 의미 있는 일이다. 그러나 지금까지 프랙탈 이론을 이용해 한반도의 자연 및 인공환경을 유형화하고 그 동인을 분석하기 위한 시도는 매우 미미한 편이다(전과 조, 1992). 본 연구는 프랙탈 이론이 한국의 경관 및 지형을 연구하는 데에 어떻게 도움이 될 수 있는가를 예시하는 데에 목표를 두고 있다. 따라서 프랙탈 이론 및 차원의 추정 방법을 소개한 다음, 프랙탈 이론이 생태학과 육수학적 현상에 어떻게 적용되는지 살펴본다. 이 과정에 일부 한국의 자료에 대해 프랙탈 차원을 추정하여 의미를 살펴보고, 마지막으로 이 방법론을 이용할 때 유념할 사항을 논의한다.

## 이론적 배경

### 1. 프랙탈 정의

자연에는 다위계 수준(multiple hierarchical level)에서 자기 조직적인 공간 구조가 있다. 그러한 구조는 에너지를 얻는 과정과 함께 엔트로피를 퍼내는 소산과정(dissipative process)에 의해 발생한다. 그 결과로 생기는 다위계 수준의 구조는 유클리드 기하학으로 기술할 수 없는 모양으로 우리가 흔히 프랙탈이라고 부르는 것이다. 1977년 Mandelbrot는 차원(dimension)이 정수(整數, integer)가 아니라 분수(分數, fraction)이고, 위계의 다른 수준에서 관찰할 때 자기유사성(self-similarity)을 가지는 계(system)를 기술하기 위해 이 용어를 도입했다.

프랙탈 기하학의 중심개념은 자기유사성이다(Nikora *et al.*, 1999). 어떤 객체를 나누었을 때 더 작은 복사물로 이루어진다면 자기유사성을 가진다고 한다. 이는 그 객체의 복잡성을 하위단위로 나누어 본질적인 규칙성을 기술할 수 있도록 한다. 이렇게 특정 규모에서 관찰한 현상이 더 작은 규모에서도 닮은꼴로 나타나는 속성을 기준으로 프랙탈은 아래와 같이 크게 두 가지 부류로 나눌 수 있다(Milne, 1991a; Hastings and Sugihara, 1993; Farina, 1998).

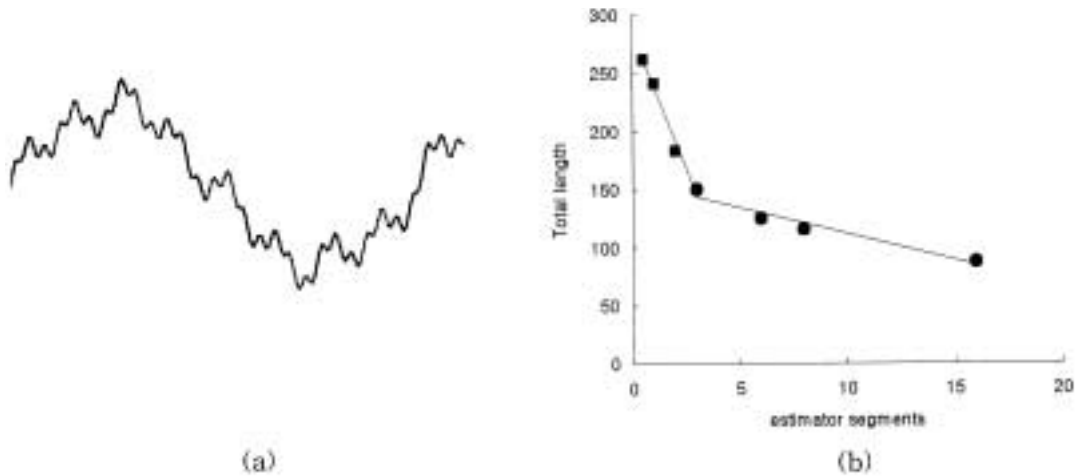
#### 1) 규칙적 프랙탈(exact or regular fractal)

부분과 전체의 유사성이 기하학적인 구조 속에서 어떤 동질성을 갖는 것을 말한다. 즉, 큰 규모와 작은 규모 사이에 엄격한 의미의 동등성(equality)이 있는 경우를 말하며, 자연에서 흔히 발견되는 현상은 아니다. 부분이 등방성(isotropic)을 가진 경우를 자기 유사성을 가졌다고 하고, 부분에서 이방성(anisotropic)이 발견되면 자기 근사성(self-affinity)을 가지고 있다고 하는데 후자는 자연에서도 발견되고 있다.

#### 2) 통계학적 프랙탈(statistical or random fractal)

부분과 전체의 유사성이 대략적으로 비슷한 확률을 갖는 것을 볼 수 있다. 즉, 동등성이 확률분포로써 표현된다. 이러한 통계적 자기 유사성의 형태가 보다 일반적이며, 해안선, 토양 단면도와 pH, 수로망과 같은 자연현상에서 발견된다.

실제 경관에서 이러한 자기 유사성이 존재하는가에 대한 논쟁은 아직 진행 중이고 많은 논문에서 결론 내리고 있는 바와 같이 자기 근사성이 더 일반적이고 더 넓은 조건에서 응용 가능하다고 알려져 있다.



**Fig. 1.** (a) A hypothetical river channel with local complexity and global simplicity and (b) relationship between total length and estimator segments on the river channel.

## 2. 프랙탈 차원

경관에 대한 연구에서 규모의 문제는 가장 기본적인 면서도 중요한 문제 중의 하나이다 (Quattrochi and Goodchild, 1997). 왜냐하면 경관을 이루고 있는 구조적 요소를 조각 (patch), 바탕 (matrix), 그리고 통로 (corridor)로 나누는 경관 생태학 관점에서 볼 때, 이들은 규모에 따라서 각기 다양한 모습이 될 수 있기 때문이다 (이도원, 2000). 이러한 규모의 문제에는 스타인하우스 모순 (Steinhaus Paradox)이 있다. 이를테면 복잡한 해안선의 길이를 측정할 때 그것을 더 작은 단위로 나누어 합산할수록 실제적인 길이는 무한히 증대하게 된다. 즉, 길이  $L$ 의 해안선이 길이  $\delta$ 의 자로  $n$ 번 나누어진다면  $L(\delta) = n \cdot \delta$  또는  $n = L(\delta) \cdot (1/\delta)$ 의 관계를 가지지만 실제로  $\delta$ 의 길이를 작게 할수록  $n \cdot \delta$ 의 값은 무한히 증가하여  $L(\delta) = k \cdot \delta^{1-D}$ 의 관계를 가지는 것으로 지적되었다 (Richardson, 1961; Mandelbrot, 1983; Sugihara and May, 1990). 여기서  $D$ 는 프랙탈 차원이다.

유클리드 기하학에서 길이  $s$ 에 대해서 점  $P = s^0$ , 선  $L = s^1$ , 면적  $A = s^2$ , 부피  $V = s^3$ 의 관계로 표현되어 점, 선, 면, 입체 3차원이 된다. 반면에 선의 경우 프랙탈 차원은 구부러지는 정도를 나타내어 굴곡이 심하면 선이 거의 면과 흡사해지기 때문에 구부러짐이 심할수록 점 점 2에 가까워진다. 이와 마찬가지로 평평한 평면이 여러 가지 뒤틀림이 심해질수록 프랙탈 차원은 2에서 3으로 가까워진다. 반면에 입체에 빈 공간이 많이 포함될수록 3차원에서 멀어지며 프랙탈 차원은 2에 가까워지며, 평면에 빈틈이 많이 생길수록 프랙탈 차원은 1에 가까

워진다. 여기서 짐작할 수 있는 바와 같이 조각 모양이 복잡할수록 프랙탈 차원은 증가하며, 한 유형의 프랙탈 차원은 경관조각 모양의 복잡성을 측정하는 방식이 된다 (Sugihara and May, 1990).

이러한 현상은 섬의 크기와 해상도의 관계, 그리고 연간 저수지 방수량의 예측값과 기대값이 측정빈도에 의해서 달라지는 관계에서도 나타난다. 이러한 관계는 모두 일반식으로  $y = ax^b$ 로 표현되어 제곱식 법칙 (power law)이 적용된다고 말한다. 이는 하천 유역에서도 적용되는 것으로 경험값인  $b$ 는 일반적으로 0.5 이상으로 알려져 있다. 여기서의 지수값은 유역 신장 경향과 같은 모양이나 지형에 있어서 크기나 규모와 관련된 변화 양상을 나타내는 값이라고 해석할 수 있다. Mandelbrot (1983)는  $b = D/2$ 가 되어야 된다고 주장하였고, 강은  $D$  값이 1.1~1.2인 프랙탈이라고 추측하였다 (Philips, 1993). 이는 여러 논문에서 적용하여 확인된 바 있다 (Seiler, 1986; Hjelmfelt, 1988). 하지만 Robert와 Roy (1990)는 단순히  $D$ 값이 길이-면적 관계에서 추론될 수 없고 그 값은 다른 지도학적 요소를 반영할 수 있다고 주장하였다.

그러나 많은 경우 규모에 따라 경관 조각을 형성하는 과정이 다르기 때문에 (Hayes *et al.*, 1987; Krummel *et al.*, 1987) 모든 규모에서 자기유사성이 유지되지 않는다. 이 때 큰 규모와 작은 규모에서 작용하는 복잡성의 정도가 다를 경우에는 프랙탈 차원이 중간에서 바뀌게 된다 (Fig. 1). 프랙탈 차원이 바뀌는 지점 이상의 규모에서는 모양을 결정하는 데 그보다 작은 규모와 다른 요인이 작용하는 경우가 일반적이다. 특히 계를 나누는 경

**Table 1.** Measurement methods of fractal dimension.

측정법	관계식	프랙탈 차원	응용 사례
분절법	$L(\tau) \propto \tau^{1-D}$ $\tau$ = 자의 길이 $L(\tau)$ = 전체 길이	$\log \tau$ 에 대해 $\log L(\tau)$ 의 그래프, 기울기가 $1-D$	해안선, 등고선 유역 둘레길이
격자법	$n \propto b^{-D}$ $n$ = 채워진 격자의 수 $b$ = 격자 크기	$\log b$ 에 대해 $\log n$ 의 그래프, 기울기가 $-D$	해안선, 등고선 식생 사진 수치고도모형에서 하천 수로망 추출 원격 탐사에서 성장 추출
둘레길이-면적법	$A \propto P^{2/D}$ $A$ = 면적 $P$ = 둘레길이	$\log P$ 에 대해 $\log A$ 의 그래프, 기울기가 $2/D$	해안선, 등고선

Adapted from Klinkenberg (1994).

계 부분과 그들의 주요 특성을 규정하는 요인이 서로 다른 계와 위계 수준의 경관 요소에서 프랙탈 차원은 대비된다. 따라서 이 대비는 쉽게 확인되지 않는 경계를 찾아내고 경관 조각의 발생과정을 유추하는 데 도움이 된다 (Sugihara and May, 1990).

### 프랙탈 차원 추정법

프랙탈 차원은 여러 가지 방식으로 계산될 수 있다. 그 중 수문 및 생태학 연구에 널리 응용되고 있는 세 가지 방법에 대해 표 1에서 요약하였으며 내용을 부연하면 아래와 같다.

#### 1. 분절법 (divider method)

어떤 조각의 둘레길이를 측정할 경우 복잡할수록 큰 자와 작은 자의 측정결과는 차이가 커진다. 프랙탈 차원이  $D$ 일 때 전체길이 ( $L$ )는 자의 길이 ( $\delta$ )가 길어질수록  $L(\delta) = K\delta^{1-D}$ 의 관계로 짧아진다 (Mandelbrot, 1983). 따라서 여러 가지 길이의 자를 사용하여 조각의 둘레길이를 재고 사용된 자의 길이와 둘레길이의 대수값을 각각  $x$ ,  $y$  좌표값으로 하여 회귀 분석하면 많은 경우 직선으로 나오며, 이는 유형의 복잡성이 규모에 따라 자기유사성을 가진다는 것을 의미한다 (Dicke and Burrough, 1988). 여기서 자의 길이가 작을수록 둘레길이는 커지기 때문에 기울기는 음의 값을 가지며, 프랙탈 차원  $D$ 는 기울기 =  $1-D$ 의 관계로 정의할 수 있다. 이 관계에서 복잡한 조각의 경우 직선의 기울기가 급해지고 프랙탈 차원  $D$ 는 증가한다. 또한  $\ln L = \ln K + (1-D) \ln \delta$ 의 관계에서  $y$  절편으로부터  $K$  값이 구해지며  $K$  값이 클수록  $L$ 이 커진다는 것을 알 수 있다.

#### 2. 격자법 (grid method)

분절법의 자 대신 한 변의 길이를 점차적으로 변화시

킨 모눈(격자)로 구성된 투명지를 지리적인 평면에 겹치고 선의 곡선 또는 조각의 경계부가 포함되는 모눈의 수를 세어 프랙탈 차원을 측정할 수 있다. 모눈의 한 변의 길이와 선이 걸린 모눈의 수를 각각 대수값으로 계산하고  $x$ ,  $y$  좌표로 하여 회귀 분석하여 기울기를 구하면 음수가 되는데 그 값에  $(-1)$ 을 곱하여 프랙탈 차원으로 한다 (Sugihara and May, 1990; Milne, 1991). 이 때 경관 조각의 경우에는 경계가 복잡할수록 그리고 여러 개의 조각으로 이루어진 경우 분산도가 클수록 프랙탈 차원도 크다.

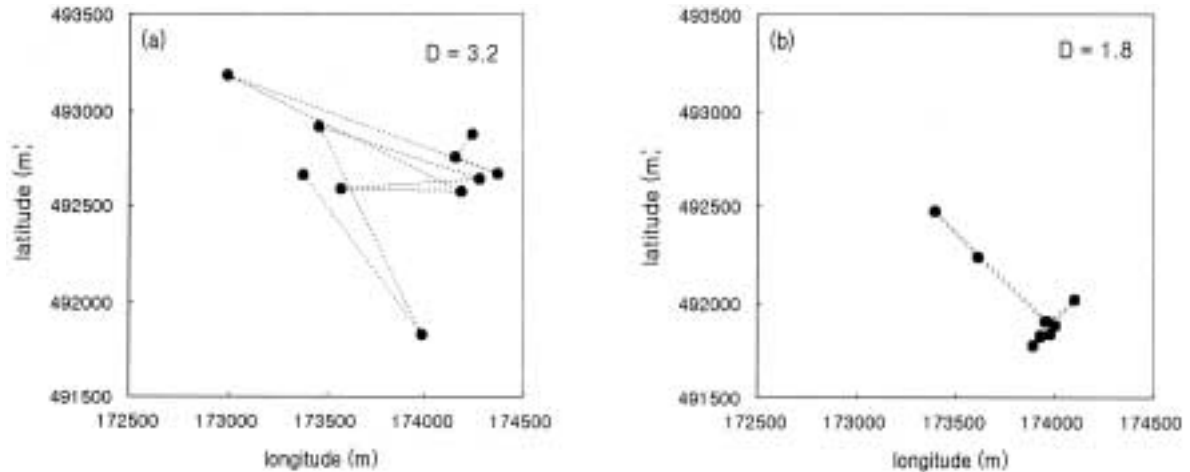
#### 3. 둘레/면적법 (perimeter/area method)

면적  $A$ , 둘레길이  $P$ 인 조각 모양의 복잡성은  $\log P = \frac{1}{2}D \log A$ 의 관계로 표현될 수 있다. 이 경우 프랙탈 차원은 조각의 면적과 둘레길이의 대수값을 회귀 분석하여 기울기에 2를 곱해서 구한다 (Mandelbrot, 1977; Lovejoy, 1982). 이를테면 원이나 정사각형의 경우에는  $D = 1$ 이며, 불규칙하고 복잡한 모양인 경우에는 둘레를 이루는 선이 면적을 채움에 따라 점점 2에 가까워진다.

### 응용 사례

#### 1. 생태학

전통적으로 생물학자들은 분절법을 이용하여 동물의 이동경로의 프랙탈 차원을 추정하였다. 이를테면 몸집의 크기가 비교되는 메뚜기의 이동경로를 프랙탈 차원으로 비교해본 결과 크기가 비슷한 *Psoloessa delicatula*와 *Opeia obscura*는 거의 동일한 프랙탈 값을 가졌으며, 몸이 큰 *Xanthippus corallipes*는 상대적으로 느리고 선형적으로 이동하여 낮은 프랙탈 차원을 보였고, *Psoloessa delicatula*와 *Opeia obscura*는 더 빠르고 복잡한 경로를 따라 움직여 큰 프랙탈 차원을 가졌다 (Wiens et al., 1995). 천천히 이동하는 생물은 작은 규모의 환경을 인



**Fig. 2.** Movement patterns of male and female wild boars during a daytime. The male boar (a) showed larger fractal dimension ( $D = 3.2$ ) than the female one (b) ( $D = 1.8$ ). Fractal dimension was calculated using a modified area/perimeter method proposed by Katz and George (1985). Data were adopted from Seo (2000).

식하는 것으로 보아 (Farina, 1998), 이 결과는 몸집 크기에 따라 미소경관에 대한 인식을 달리하고 있는 사실을 뒷받침한다. 저자들은 이러한 이동 양식이 동물들의 환경인식 방식과 사용하는 자원의 분포와 관련이 있는 것으로 설명했다. 이러한 연구결과는 동물의 미소경관 인식과 그에 바탕한 이동방식은 생리적 압박을 경험하고 적당한 서식처, 배우자, 먹이, 또는 포식자를 만날 가능성을 결정하며, 결과적으로 개체군의 분포와 유전자 교환 또는 생태계에서 영양소 분포를 결정하는 중요한 인자라는 생태적 함축성을 지니고 있다. Katz와 George (1985)은 개체의 이동경로에 대해 걸음의 수, 총 걸은 거리, 평면지름(가장 먼 두 지점간의 거리)을 이용해 프랙탈 차원을 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 프랙탈 차원을 이용한 최근의 늑대 연구에서는 암컷과 수컷의 이동경로가 다르며, 그 까닭이 암수컷 늑대의 먹이사냥 전략 차이와 관련이 있는 것으로 밝혀졌다 (Bascompte *et al.*, 1997).

이와 관련된 국내의 연구로는 서창완 (2000)에 의한 멧돼지 암·수컷의 이동경로의 측정이 있다. 그의 자료를 기반으로 암·수컷의 이동경로에 대한 프랙탈 차원을 구하면 그림 2와 같다. 하루동안의 암컷과 수컷간의 이동경로에 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 계산된 수컷의 프랙탈 차원은 3.2로 암컷의 1.8에 비해 매우 높은 값을 보여 주었다. 선형형에서 2 이상의 프랙탈 차원은 개체가 일정한 공간 내에서 배회하며 그 자취가 서로 중첩되는 경우에 해당한다 (Katz and George, 1985). 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 수컷은 암컷에 비해

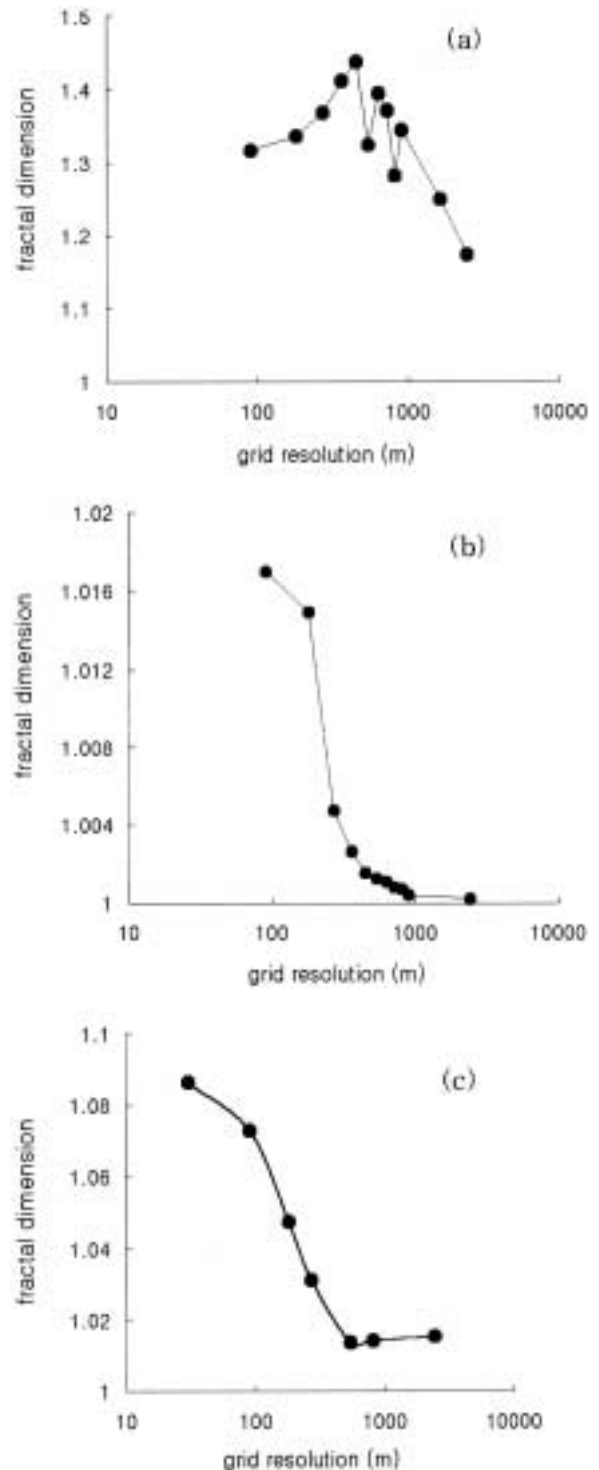
보다 넓은 지역을 배회하며, 암컷은 한 번의 큰 이동 외에서 일정한 지점에 머물고 있다. 이는 암·수컷간의 서식처, 가족관계, 먹이취득 등과 같은 요인을 반영하는 것으로 해석될 수 있다.

주어진 면적의 서식처에 큰 생물보다 작은 생물들이 매우 많이 살 수 있는 이유도 프랙탈 차원으로 정량적인 해석이 가능하다. 이를테면 갑각류가 서식하는 식생을 투사한 사진에서 표면적의 프랙탈 차원을 격자법에 의해 구했을 때 값은 1.3과 1.5 범위에서 유지되었다 (Morse *et al.*, 1985; Sugihara and May, 1990). 잎 둘레에 대한 프랙탈 차원의 근사값을 1.5라고 가정한다면 Mandelbrot의 방식에 따라 잎 표면에 대한 프랙탈 차원의 상한과 하한치는 3과 2.5가 된다.  $A(\delta) = K\delta^{2-D}$ 의 분절법에서 제시된 계산식에 따를 때 (여기서 A는  $\delta$ 의 자를 이용해 측정된 둘레길이 L( $\delta$ )로 둘러싸인 면적), 자의 길이 ( $\delta$ )가 10배 줄어들 때 따라 감지되는 표면적의 상대적인 크기는 다음의 관계에 의해 예측된다.  $A(\delta/10)/A(\delta) = (\delta/10)^{2-D}/\delta^{2-D} = (1/10)^{2-D} = 10^{D-2}$ . 따라서 D가 2.5에서 3사이인 경우 자의 길이가 10배 줄어들면 면적은 상대적으로  $10^{2.5-2} = 10^{0.5} = 3.16$ 배에서  $10^{3-2} = 10^1 = 10$ 배까지 커짐을 알 수 있다. 즉 10배 정도 크기가 작은 개체는 큰 개체에 비해 3.6배에서 10배나 더 많은 서식처 공간을 감지하게 된다. 이 사실은 미세한 해상도로 식물 표면을 인식하는 생물은 동일한 면적에서 서식할 수 있는 공간을 그만큼 많이 활용할 수 있다는 사실을 의미한다 (Morse *et al.*, 1985; Sugihara and May, 1990).

프랙탈 차원 분석은 경관 조각 모양과 유형을 결정하

는 과정의 규모를 결정하고, 경관 조각 또는 생태계의 관찰에 본질적으로 내재되어 있는 어려움을 이해하는데도 유용하다. 이를테면 미국 중남부 지역의 숲 조각들에 대해 둘레길이-면적법으로 프랙탈 차원을 계산해 본 결과 크기에 따라 흥미 있는 변화가 나타났다 (Krummel *et al.*, 1987). 작은 숲 조각에서는 프랙탈 차원이  $1.20 \pm 0.02$  정도로 낮은 값이었으나, 60~70 헥타르 크기의 숲 조각에서 급격히 증가했다. 70 헥타르 이상으로 큰 숲 조각들에서는 프랙탈 차원이  $1.52 \pm 0.02$ 로 비교적 높은 값을 유지했다. 이 결과는 작은 숲 조각이 주로 농경지 개발 활동인 인위적인 영향을 우세하게 받아 단순한 모양을 지니고 있는 반면에 큰 숲 조각들은 지형과 수문 과정에 의한 토양형의 분포 등에 의해 좌우되어 복잡한 모양을 지니고 있는 사실을 보여주었다. 여기서 프랙탈 차원이 큰 쪽으로 변하는 60~70 헥타르 크기의 숲 조각 모양은 자연적·인위적 영향이 동시에 작용하여 결정되기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 이처럼 중간 규모의 연구 대상들은 적은 수의 우세한 조절인자보다 다양한 요소들이 우열을 가리기 어려울 정도로 복잡적으로 작용하기 때문에 연구하기 어렵다는 사실을 확인시켰다 (Allen and Hoekstra, 1992).

설악산 국립공원 일대의 동일 위도상에 위치한 지점들을 대상으로 수치고도모형 (DEM, digital elevation model), 지형효과를 고려한 일사량 모형에 의해 예측된 일사량 및 Landsat TM 영상으로부터 추정된 엽면적 지수에 대해서 프랙탈 차원을 조사한 결과 해상도에 따라 각기 다른 프랙탈 차원의 변화가 관측되었다 (그림 3). 일사량과 엽면적 지수는 해상도에 따라 유사한 변화를 보여 주었는데 100 m에서 1,000 m의 공간 해상도에서 프랙탈 차원이 급격히 감소하였고 1,000 m 이상에서는 거의 일정한 프랙탈 차원을 보였다. 반면에 수치고도모형은 200 m 이상에서부터 급격한 변이를 보이기 시작했으며 4,000 m 정도의 해상도에서도 여전히 변화하는 양상을 보였다. 이 결과는 중동부 산악지방의 지형, 기상환경 및 식물 성장간의 공간적 규모성을 보여주는 예라고 할 수 있다. 수치고도모형에서 나타난 프랙탈 차원의 변화는 백두대간을 경계로 한 급격한 고도의 감소에 의한 영향으로 파악된다. 그러나 일사량 및 엽면적 지수가 1,000 m 보다 큰 해상도에서 일정한 프랙탈 차원을 보이는 것으로 보아, 이들에서 나타나는 변이성은 주로 백두대간 양안의 고도차에 의한 영향보다는 1,000 m 이하의 규모에서 나타나는 지형, 토질, 수분조건 등의 이질성에 기인하는 것으로 해석된다.



**Fig. 3.** Scaling behavior of fractal dimension of (a) DEM, (b) topographic solar radiation, and (c) leaf area index (Kang *et al.*, unpublished data). Solar radiation was calculated based on DEMs of different pixel sizes from 30 to 4,160 m. Leaf area index was derived using normalized differenced vegetation index (NDVI) from Landsat TM image.

## 2. 육수학

모든 종류의 강 유역에서 자기 유사성이 발견될 수 있다 (Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997). 즉 하천의 수로망은 지형도 축척에 따라 규칙적인 양상을 내포하는 상사성(相似性)을 가지고 있기 때문에 프랙탈로 간주될 수 있다(전과 조, 1992). 하천 지형 뿐 아니라 자연에 존재하는 유형들은 에너지 소산이 최소가 되는 자기조직화 방향으로 진화하면서 새로운 질서를 창출한다. 프랙탈을 형성하고 있는 다양한 형태의 하천이 존재한다는 사실 역시 이러한 맥락 안에서 이해될 수 있다(Bak *et al.*, 1993; Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1994; 김용정, 1996).

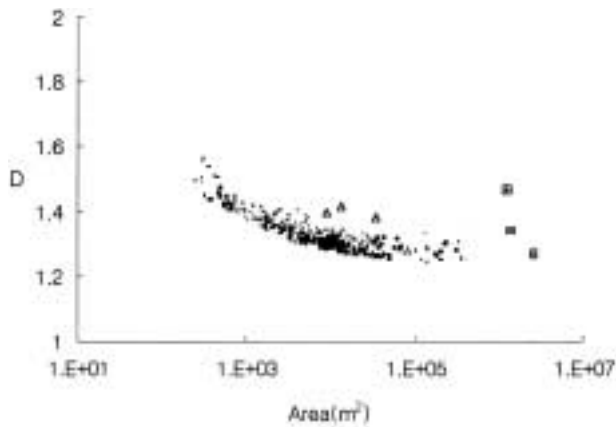
1980년 후반부터 배수 구역 연결망(network)과 그와 동반하고 있는 경관의 자기 유사적인 특징을 연구하기 위해 수치고도모형을 사용하여 유역 연구에 필요한 요소들을 만들었고, 이는 최근까지도 사용되고 있다. 즉 대부분 하천 수로망에 대한 프랙탈 차원은 2에 가까운 값이고, 각각의 하천에 대해서 특히 본류에 대해서는 1에 가깝다고 연구되었다. 하천 길이비와 유역 면적에 관한 Horton's Law를 적용하여 프랙탈 차원을 주로 계산했는데(Chow, 1964; Eagleson, 1970; Feder, 1988; Tarboton *et al.*, 1988; Rosso *et al.*, 1991; 전과 조, 1992), 이 법칙은 하천 수로망에 관한 것으로 Strahler (1952)의 하천 차수 결정 방법을 따라 각각 독립된 지류 사이의 분류체계를 나타냄으로써 하천 수로망의 구조를 정량적으로 분석하는 방법이다(La Barbera *et al.*, 1989). 그러나 Horton's Law를 이용하여 프랙탈 차원을 분석한 연구들은 완벽한 자기 유사성을 가지고 있는 Hortonian network안에서만 만족하는 것이어서 이를 해결하기 위한 방법으로 Tokunaga cyclicity의 개념이 제안되기도 하였다(Tarboton, 1996). 프랙탈은 임의의 유역에서 효과적인 배수를 위한 적정 수로망(Optimal channel networks, OCNs)의 연구에도 응용되었다. OCN의 구조는 국부적으로 그리고 전체적으로 에너지 소산의 속도가 최소가 되도록 하는 나뭇가지형 구조라고 한다(Howard, 1990; Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1992b; Rigon *et al.*, 1993).

하천 연결망의 자기 유사성과 자기 근사성에 대한 연구의 결과 하천 연결망은 자기 유사성보다는 자기 근사성을 가지고 있다는 것이 밝혀졌다. 미국, 러시아, 루마니아에 있는 강들로부터 얻어진 자료를 이용해 강 배수 유역들은 일반적으로 성글고, 자기 근사성 프랙탈 객체임을 알 수 있었다(Nikora *et al.*, 1994). Sapozhnikov 등(1996)은 다른 규모와 다른 수문학적·지형학적 특성을 가진 망류하도(網流河道, braided channel)에 대해 log-

arithmic correlation integral method을 사용하여 공간적 규모에 따른 지형특성을 분석하였다. 결과적으로 강들은 이방성 스케일링(anisotropic scaling)을 보여주었다. 강들이 유사한 공간 비례축척을 보여주었다는 것은 망류하도가 형성될 때 기초를 이루는 기작에 있어서 공통성이 있다는 것을 의미한다. 그리고 프랙탈 차원의 특성을 비교하여 보면, 망류하도는 단일하도(single-channel) 강에서 수로망 구조의 하천으로 진화해 가는 단계에 있는 프랙탈 객체들의 부류에 해당한다는 사실을 유추해 낼 수 있다. 더구나 자연 유역의 수치고도모형, 프랙탈 구조 그리고 OCN을 서로 비교하여 보면 정확한 자기 유사성의 형태가 나타나지 않고 통계적 자기 유사성이 나타난다(Rigon *et al.*, 1993). 하천 수로망의 프랙탈 분석은 고전적인 하천 지형학(fluvial morphology)과 연관성을 가진다. 하천 수로망에서 산출된 프랙탈 차원은 배수체계(drainage system)의 공간 매움 특성으로 해석되어 왔다. 그러나 프랙탈 차원을 특정 공간 규모 범위에서 수로망 진화에 영향을 미치는 지질학적 제약 정도의 지표로서 해석하는 것이 더 정확하다는 해석도 제기되었다(Philips, 1993).

단순한 하천 길이와 면적간의 연구와 더불어 프랙탈 개념은 유역 지형 전체에 대한 연구에도 응용되고 있다. 하천 평면의 비례 축척 특징에 따른 계곡의 모양의 영향에 대해서 측정된 바 있는데 빙하 계곡에서는 규모가 작아질수록 큰 프랙탈 차원을 나타내었고, 충적 계곡(alluvial valley)에서는 반대로 규모가 커질수록 더 큰 프랙탈 차원을 나타내었다. 이것은 강 평면 모양의 스케일링 특성이 계곡 흐름 형태를 결정짓는 지형학적인 과정들과 관련 있다는 것을 알 수 있다(Beauvais *et al.*, 1996).

Krummel (1987)이 사용한 산림 조각의 면적과 프랙탈 차원간의 관계에 대한 분석방법을 이용하여 우리나라 지형에서의 프랙탈 차원의 적용성을 살펴보았다. 서울 인접 지역 중에서 근래 난개발이 진행중인 용인시 주변의 호소들을 96년 지형도(1:25,000)에서 디지털화하여 둘레길이-면적 방법으로 프랙탈 차원을 계산하였다(그림 4). 대개 1.23~1.56의 값을 나타내었고, 평균은 1.33으로 대부분의 호소의 프랙탈 차원은 1.5 이하의 값이었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 대체적으로 면적이 증가함에 따라 프랙탈 차원은 감소하였는데, 이는 어느 정도 크기의 저수지나 보 등이 고루 분포하고 있고 이들 대부분이 농경지나 개발지 옆에 위치하고 있는 이유로 그 경계가 인간의 토지 이용의 결과로 단순하다는 것을 보여준다. 이를 지지하고 있는 결과로 면적이 크고



**Fig. 4.** Variation in fractal dimension (D) depending on surface areas (A) of reservoirs. Open triangle ( $\Delta$ ) and square ( $\square$ ) indicate fractal dimension of reservoirs lying in recreation field and forested area, respectively (Chang *et al.*, unpublished data).

그 모양이 다른 호소에 비해 복잡한 세 가지 호소들( $\square$  표)은 모두 산림 내에 있는 호소로 그 모양을 결정하는 요소들이 인위적인 요인들보다는 거의 자연적인 요인들로 구성되어 있다고 유추할 수 있다.  $\Delta$  표는 다른 호소들에 비해 프랙탈 차원이 큰 호소들인데, Landsat TM 1996년 영상자료를 이용하여 추출된 토지 이용도에 의하면 이는 주로 초지 내에 있는 골프장의 연못으로 인위적 설계의 결과라고 생각된다.

## 고 찰

전통적인 유클리드 기하학으로 불규칙적인 특성을 가진 경관 요소를 설명하기 어렵지만, Mandelbrot (1983)에 의해 제안된 프랙탈 기하학은 경관의 복잡성이나 여러 규모에 걸쳐 반복적으로 나타나는 역동성을 설명하는 데 새로운 해석 방식이 된다. 이는 경관의 위계적인 복잡성과 규모에 따른 유형과 과정들을 조사하는 데 적절하기 때문이다. 프랙탈은 경관 요소의 유형 뿐만 아니라 그것과 관련된 과정을 설명할 수 있는 장점이 있다 (Krummel *et al.*, 1997). 프랙탈 개념은 생태학과 육수학적 현상을 이해하는 데도 도움이 된다. 각 학문분야마다 프랙탈 기하학이 이용되는 방법이 조금씩 다르기는 하지만 공통적으로 프랙탈 차원은 공간 유형의 상태뿐만 아니라 그의 원인이 될 수 있는 생태적 과정을 이끌어 내는 지표로 이용되고 있다. 일례로 Williamson과 Lawton (1991)은 널리 알려진 생물종의 수와 경관조각 면적 사이의 관계가 프랙탈 과정으로 설명될 수 있음을 보여주

었다. 또한 그들은 한 경관조각 내의 우점종들의 풍부도에 결정하는 자원의 분할과정이 일종의 프랙탈 과정으로 해석될 수 있음을 언급하였다. 그러나 Otto (1996)는 다른 프랙탈 차원을 가진 산림 경관조각에서 조류의 생물량 분포에 대해 조사한 결과 경관유형과 생태적 과정의 지표로 사용된 조류의 생물량 사이에는 유의성 있는 상관성을 발견하지 못하였다.

현재는 프랙탈 차원이 표면 위상 (surface topology)를 설명할 수 있다는 것이 증명되었기 때문에 복잡한 자연 경관을 수학적으로 설명할 수 있고 정량적인 방법으로 경관을 특징지을 수 있는 체계적인 방법으로 받아들여지고 있다 (Xu *et al.*, 1993). 이처럼 프랙탈 이론은 그 응용 범위가 넓어지고 있다. 예를 들면 컴퓨터 이미지 과학에서는 전송과 저장의 데이터 양을 줄일 수 있기 때문에, 그리고 의학 분야에서는 인간의 신체 구조가 프랙탈과 유사하기 때문에 이용되고 있고, 인간 심리나 주식 가격의 변화 등도 프랙탈에 의한 분석 대상이 되고 있다 (구윤모, 1993). 프랙탈 개념은 앞선 활용 사례 이외에도 자연 과학 분야에서 새로운 경관 설계가 동물 이동, 위치 그리고 에너지에 어떤 영향을 주는지 먹이 찾는 동물을 모의시험에도 사용된다. 프랙탈을 이용한 모형은 설계된 경관들이 동물 활동에 바람직한 작용을 할 수 있을 것인지 평가하는 캐드 (CAD, computer aided design) 패키지와 같이 사용될 수 있는 방법으로 제안될 수 있다 (Milne, 1991). 또한 원격 탐사와 지리 정보 체계 기법과 결합으로 이루어진 연구 논문에서는 프랙탈이 주로 영상의 질감 (texture)과 경관의 거칠기 (roughness)를 계산하는 데 사용되고 있다 (Emerson *et al.*, 1999). 특히 근래에는 레이더 위성고해상도의 영상역시 광역 지역에 대한 프랙탈 차원을 추정에 많이 이용되고 있다 (Henri *et al.*, 1999). 프랙탈 차원의 계산으로 영상 분류의 정확성을 높일 수도 있다 (De Cola, 1989; De Jong *et al.*, 1995).

그러나 넓은 의미에서 프랙탈 차원을 경관이라는 넓은 지형에 적용할 때 문제되는 것들이 있다. 하나는 이 차원을 해석하는 방법상의 문제이다. 그 값이 단순한 불규칙성이나 거칠기만을 나타내는 것이 아니며 여러 생태적인 과정들과 프랙탈 차원의 관계를 완전하게 설명할 수 있는 실증적인 자료나 연구가 미흡하기 때문이다 (Klinkenberg *et al.*, 1992). 또 다른 문제는 자기 유사성의 존재가 확실하여야 프랙탈 차원의 값이 의미가 있지만 여러 논문에서 밝히고 있는 바와 같이 특정 규모에서 자기 유사성이 나타나고 있는 것으로 보아 프랙탈 연구에서 목적에 따른 규모 선정이 매우 중요한 관건이



된다(Leduc *et al.*, 1994; Bension *et al.*, 1995). 마지막 문제는 프랙탈을 연구하기에 적절한 규모가 규정되어 있지 않다는 점인데 이는 연구 대상의 지형 특성과 함께 목적에 부합되도록 충분히 고려해야 할 중요한 요소이다. 특히 우리 나라의 경우 작은 규모일수록 복잡한 토지 이용이 나타나는 지형의 경우에는 무작정 프랙탈 차원을 구하는 것은 미세한 규모에서 작용하는 영향들을 무시한 결론을 이끌어 낼 수 있다.

공간적 유형을 정량화하기 위한 유클리드 기하학과 전통적인 프랙탈 분석은 여러 가지로 많은 한계점들을 가지고 있다. 이를테면 유형을 좀더 세밀하게 살펴 본 결과 그들만의 독특하고 국소 스케일링 지수(local scaling exponent)를 가지고 있는 세부 집단이 있음을 짐작할 수 있다. 이와 같이 프랙탈 안에 프랙탈이 포함되어 있는 개념으로 이를 다중 프랙탈(multifractal)이라 한다. 이는 유체 난류(fluid turbulence), 은하 성단(galaxy clustering), 산림계의 역동성과 같은 비선형적 현상들과 관련 있는 것이고 이는 공간 자료와 원격 탐사 자료로서 평가될 수 있다. 하천 유역에 관한 지구 물리학적 문헌에 의하면, 다중 프랙탈 분석은 집수 지역 분포의 공간적 변동 특성을 연구하고 에너지 소산의 대한 정량적 연구에 사용되고 있다. 이 분석은 결집 모형(aggregation model)과 수치고도모형을 둘 다 병행하여 사용하고 있다(Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997). 다중 프랙탈 기술은 삼림 공간 유형의 특이성을 설명하는 데 도움이 되는 유용한 연구 방법이다. 여러 학자들이 지적한 바에 의하면 삼림 생태계 내의 다중 프랙탈적인 유형을 일어나게 하는 자연적인 근본 원인을 알아내기 위해서는 생물적인 요인을 만들어내는 다중 프랙탈과 함께 무생물적인 상태를 만들어내는 기본적인 다중 프랙탈의 형판(template)과 병행될 수 있는 모형의 개발이 필요하다(Drake *et al.*, 2000).

여러 가지 경관의 형태학적 특성에서 언급되고 있는 많은 변수들처럼 프랙탈 차원은 다양한 과정들에 의해 생성되는 지형 형태를 반영하는 것은 사실이다. 그러나 프랙탈 차원의 의미는 그것을 계산할 때 적용한 공간 범위 바깥으로 외삽될 때는 오류가 생길 수 있다. 따라서 프랙탈 차원은 계산에 사용된 특정한 공간 규모 안에서 일어난 지질학적 제약 정도를 알려주는 지표로 해석하는 것이 안전하다(Philips, 1993).

## 사 사

영문 초록을 교정해준 강호정 (University of Wiscon-

sin at Madison, WI), 이승규 (서울대학교 외교학과), 이지은 (미국대사관)씨와 한국육수학회의 투고 과정에서 건설적인 제안으로 내용과 편집에서 발전되도록 도움을 준 두 심사자에게 감사한다.

## 인 용 문 헌

- 구윤모. 1993. fractal과 chaos. 서울공대 **11**: 41-53.
- 김용정. 1996. 엔트로피법칙과 프리고진의 산일구조. 과학사상 **16**: 147-172.
- 전민우, 조원철. 1992. 지형도 축척에 따르는 하천 수로망과 분류 하천 길이에 관한 fractal dimension. 대한토목학회 논문집 **12**: 97-10.
- 서창완. 2000. GIS와 로지스틱 회귀분석을 이용한 멧돼지 서식지 모형 개발. 박사학위논문, 서울대학교, 서울.
- 이도원. 2000. 환경 계획, 설계, 관리를 위한 경관생태학. 서울대학교출판부, 서울 (출간 예정).
- Allen, T.F.H. and T.W. Hoekstra. 1992. Toward a Unified Ecology. Columbia University Press, New York.
- Bak, P. and K. Sneppen. 1993. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Physics Review Letter* **71**: 4083-4086.
- Bascompte, J. and C. Vila. 1997. Fractals and search paths in mammals. *Landscape Ecology* **12**: 213-221.
- Beauvais, A.A. and D.R. Montgomery. 1996. Influence of valley type on the scaling properties of river planforms. *Water Resources Research* **32**: 1441-1448.
- Bension B.J. and M.D. Machenzie. 1995. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecology* **10**: 113-120.
- Bruce, T. Milne. 1991. Lessons from applying fractal models to landscape patterns, p.199-235. In : Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity (M.G. Turner, R.H. Gardner, eds.). Springer-Verlag, New York.
- Chow, V.T. and Ed. 1964. Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- De Cola, L. 1989. Fractal analysis of a classified Landsat scene. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **55**: 601-610.
- De Jong, S.M. and P.A. Burrough. 1995. A fractal approach to the classification of Mediterranean vegetation types in remotely sensed images. *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing* **61**: 1041-1053.
- Dicke, M. and P.A. Brurrough. 1988. Using fractal dimensions for characterizing tortuosity of animal trails. *Physiological Entomology* **13**: 393-398.
- Drake, J.B. and J.F. Weishampel. 2000. Multifractal analy-

- sis of canopy height measures in a longleaf pine savanna. *Forest Ecology and Management* **128**: 121–127.
- Eagleson, P.S. 1970. *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Emerson, C. W., N.S.-N. Lam and D.A. Quattrochi. 1999. Multi-scale fractal analysis of image texture and pattern. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **65**: 51–61.
- Farina, A. 1998. *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman & Hall, London, UK.
- Feder, J. 1988. *Fractals*. Plenum, New York.
- Gupta, V.K. and E. Waymire. 1993. A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade. *Journal of Application Meteorology* **32**: 251–267.
- Hastings, H.M. and G. Sugihara. 1993. *Fractals; A user's guide for the natural sciences*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Hayes, T.D., D.H. Riskind and W.L. Pace, III. 1987. Patch-within-patch restoration of man-modified landscapes within Texas state parks, p. 173–198. In : *Landscape Heterogeneity and Disturbance* M.G. Turner (eds.). Springer-Verlag, New York.
- Henri, M. and P. Matteo. 1999. Fractal characterization of a hydrological basin using SAR satellite images. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* **37**: 175–181.
- Hjelmfelt, A.T. 1988. fractals and the river length-catchment area ratio. *Water Resources Bulletin* **24**: 455–459.
- Howard, A.D. 1990. Theoretical model of optimal drainage networks. *Water Resources Research* **26**: 2107–2117.
- Ijjasz-Vasquez, E.J., R.L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe. 1992. On the multifractal characterization of river basins, Proceedings of the 23rd Blinghampton geomorphology conference 24–27.
- Kang, S., S. Kim, S. Oh and D. Lee. 2000. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *Forest Ecology and Management* (in press).
- Katz, M.J. and B.G. Edwin. 1985. Fractals and the analysis of growth paths. *Bulletin of Mathematical Biology* **47**: 273–286.
- Klinkenberg, B. 1994. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features. *Mathematical Geology* **26**: 23–46.
- Klinkenberg, B. and M.F. Goodchild. 1992. The fractal properties of topology : a comparison of methods. *Earth Surface Processes and Landforms* **17**: 217–234.
- Krummel, J.R., R.H. Gardner, G. Sugihara and R.V. O'Neil. 1987. Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos* **48**: 321–324.
- La Barbera, P. and R. Rosso. 1989. On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research* **25**: 735–741.
- Leduc, A., Y.T. Prairie and Y. Bergeron. 1994. Fractal dimension estimates of a fragmented landscape: sources of variability. *Landscape Ecology* **9**: 279–286.
- Lovejoy, S. 1982. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science* **216**: 185–187.
- Mandelbrot, B.B. 1977. *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W.H. Freeman, San Francisco, CA.
- Mandelbrot, B.B. 1983. *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman & Co., San Francisco, Ca.
- Milne, B.T. 1991. The utility of fractal geometry in landscape design. *Landscape and Urban Planning* **21**: 81–90.
- Morse, D.R., J.H. Lawton, M.M. Dodson and M.H. Williamson. 1985. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. *Nature* **314**: 731–733.
- Nikora, V.I. 1994. On self-similarity and self-affinity of drainage basins. *Water Resources Research* **30**: 133–137.
- Nikora, V.I., C.P. Peason and U. Shanker. 1999. Scaling properties in landscape patterns: New Zealand experience. *Landscape Ecology* **14**: 17–33.
- Otto, R.D. 1996. An evaluation of forest landscape spatial pattern and wildlife community structure. *Forest Ecology and Management* **89**: 139–147.
- Peckham, S. and E. Waymire. 1992. On a symmetry of turbulence. *Communication Mathematics and Physics* **147**: 365–370.
- Philips, J.D. 1993. Interpreting the fractal dimension of river networks, p. 142–157. In : *Fractals in Geography* (N.S.N. Lam, L. De Cola, eds.). PTR Prentice-Hall, New Jersey.
- Quattrochi, D.A. and M.F. Goodchild. 1997. *Scale on Remote Sensing and GIS*. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Richardson, L.F. 1961. The problem of contiguity: an appendix of statistic of deadly quarrels. *General Systems Yearbook* **6**: 139–187.
- Rigon R., A. Rinaldo, I. Rodriguez-Iturbe, R.L. Bras and E. Ijjasz-Vasquez. 1993. Optimal channel networks: a framework for the study of river basin morphology. *Water Resources Research* **29**: 1635–1646.
- Rodriguez-Iturbe, I., A. Rinaldo, R. Rigon, R.L. Bras and E. Ijjasz-Vasquez. 1992b. Energy dissipation, runoff production and the three-dimensional structure of channel networks. *Water Resources Research* **28**: 1095–

- 1103.
- Robet, A. and A. Roy. 1990. On the fractal interpretation of the mainstream length drainage area relationship. *Water Resources Research* **26**: 839–842.
- Rodriguez-Iturbe, I. and A. Rinaldo. 1997. *Fractal River Basins : Chance and self-organization*. Cambridge University Press. New York, NY.
- Rodriguez-Iturbe, I., M. Marani, R. Rigon and A. Rinaldo. 1994. Self-organized river basin landscapes : fractal and multifractal characteristics. *Water Resources Research* **30**: 3531–3539.
- Rosso, R., B. Bacchi and P. La Barbera. 1991. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resources Research* **27**: 381–387.
- Sapozhnikov, V. and E. Foufoula-Georgiou. 1996. Self-affinity in braided rivers. *Water Resources Research* **32**: 1429–1439.
- Scheidegger, A.E. 1967. Some implications of statistical mechanics in geomorphology, *IASH bu* **119**: 12–16.
- Seiler, F.A. 1986. Use of fractals to estimate environmental dilution factors in river basins. *Risk analysis* **6**: 15–25.
- Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area altitude) analysis of erosional topography. *Geology Society American Bulletin* **63**: 1117–1142.
- Sugihara, G. and R.M. May. 1990. Application of fractals in ecology. *Trends in Ecology and Evolution* **5**: 79–86.
- Takayasu, H., I. Nishikawa and H. Tasaki. 1989. Power law mass distribution of aggregation systems with injection. *Physics Review A* **37**: 3110–3117.
- Tarboton, D.G. 1996. Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity. *Journal of Hydrology* **187**: 105–117.
- Tarboton, D.G., R.L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe. 1988. The fractal nature of river networks. *Water Resources Research* **24**: 1317–1322.
- Wiens, J.A. 1995. Landscape mosaic and ecological theory, p. 1–26. In: *Mosaic Landscapes and Ecological Processes* (L. Hansson, L. Fahrig, G. Merriam, eds.). Chapman & Hall, London, UK.
- Williamson, M.H. and J.H. Lawton. 1991. Fractal geometry of ecological habitats. In: *Habitat structure : the physical arrangement of objects in space* (S.S. Bell, E.D. McCoy, H.R. Mushinsky, eds.). Chapman & Hall, London, UK.
- Xu, T., I.D. Moore and J.C. Gallant. 1993. Fractals, fractal dimension and landscapes a review. *Geomorphology* **8**: 245–262.

**KOREAN JOURNAL OF LIMNOLOGY (ISSN 1225-1437) Vol. 33, No. 2**

Publisher: Lee, Gab Sook

Editor: Chio, Chung-II

Printed in June 25, 2000

Published in June 30, 2000

Publication: The Korean Society of Limnology, Inc.

Department of Biological Education, Taegu University,  
Kyungsan, Korea 712-714.

Print: Jungshaengsa, Inc., 236-7 Yongdu-Dong, Dongdaemoon-Gu,  
Seoul, 130-070, Korea (Tel: 02-925-3214, Fax: 02-928-3213)

E-mail : jungheng@chollian.net or jung333@unitel.co.kr